

Д. А. ШОКАРЕВ, Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО, Г. Ю. РЫКОВ

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА

В статье рассмотрена возможность и перспективы использования в качестве генератора асинхронной машины с фазным ротором в системах ограниченной мощности или в автономных источниках электропитания питания в составе ВЭС или мини ГЭС. На основе предложенной и разработанной математической модели рассмотрены и проанализированы режимы работы генератора в системах ограниченной мощности и в автономном режиме работы. Построены и исследованы модели систем электроснабжения на основе асинхронной машины с фазным ротором в качестве асинхронного и синхронного генератора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, асинхронный генератор, энергосистема, электрическая станция

Д. А. ШОКАРЕВ, Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО, Г. Ю. РЫКОВ

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ В ЯКОСТІ ГЕНЕРАТОРА

У статті розглянута можливість і перспективи використання в якості генератора асинхронної машини з фазним ротором в системах обмеженої потужності або в автономних джерелах електроживлення в складі вітроелектростанцій (ВЕС) або міні ГЕС. На основі запропонованої і розробленої математичної моделі розглянуті і проаналізовані режими роботи генератора в системах обмеженої потужності і в автономному режимі роботи. Побудовано та досліджено моделі систем електропостачання на основі асинхронної машини з фазним ротором в якості асинхронного і синхронного генератора.

Ключові слова: асинхронний двигун з фазним ротором, асинхронний генератор, енергосистема, електрична станція

D. A. SHOKAROV, D. A. MIKHAYLICHENKO, G. YU. RYKOV

THE ANALYSIS OF OPERATION MODES OF AUTONOMOUS SYSTEM OF ELECTRICAL POWER SUPPLY ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS MACHINE WITH A PHASE ROTOR AS THE GENERATOR

In the article the possibility of use as the generator of the asynchronous engine with a phase rotor in the systems of limited power such as the independent power supplies on the basis of wind electric station , mini and small hydroelectric power stations is considered. On the basis of the offered mathematical model generator operation modes in the system of limited power and in a standalone mode have been considered and analyzed. Models of the asynchronous engine with a phase rotor in an asynchronous and synchronous operation mode of the generator have been constructed and probed.

Keywords: asynchronous engine with a phase rotor, asynchronous generator, a power supply system, electrical station

Введение: В настоящее время большое количество фермерских хозяйств, удаленных от крупных населенных пунктов, остаются не подключенными к централизованным источникам электроснабжения, поскольку это в большинстве случаев экономически и технически нецелесообразно.

В то же время малые реки с необходимым запасом гидроресурсов позволяют достаточно экономно решать проблему электроснабжения маломощных потребителей. Достоинством применения гидроэнергии, в сравнении с другими, является зачастую сравнительно небольшое изменение скорости течения воды в течение года, отсутствие периодов затишья.

Электроэнергия, выработанная на мини ГЭС и малых ГЭС имеет самую низкую себестоимость по сравнению с электроэнергией от других возобновляемых и традиционных источников энергии. При их строительстве, в отличие от мощных гидроэлектростанций, практически исключается экологический ущерб (затопление земель, нарушение рыбозабоев и судоходства, изменение баланса климатических условий местности и т.д.).

Одним из важнейших узлов мини ГЭС является генератор. Помимо простого генерирования электроэнергии, генератор должен обеспечить стабилизацию параметров электроэнергии. Из этого вытекает одно из важных требований к генератору

мини ГЭС – это управляемость. Кроме того, конструкция генератора для мини ГЭС должна отвечать таким требованиям как дешевизна и высокая надежность работы на открытом воздухе долгое время [1].

В автономных энергосистемах малой мощности в качестве источников энергии используются таких электрических машин как: синхронный генератор (СГ), генератор постоянного тока (ГПТ), асинхронный генератор (АГ) с короткозамкнутым ротором с конденсаторным возбуждением.

Синхронные генераторы являются наиболее распространенными генераторами для питания автономных потребителей на базе ВЭУ. Отличительная особенность синхронного генератора заключается в том, что они не нуждаются в дополнительном источнике реактивной мощности для создания рабочего магнитного потока, но главными недостатками является высокая стоимость и трудности в регулировании синхронных генераторов при изменении нагрузки на шинах генератора.

В ряде стран для преобразования энергии в установках возобновляемой энергетики (особенно в мини ГЭС и ВЭС) нашли широкое применение АГ.

Идея использования асинхронного генератора для автономных систем давно привлекает внимание исследователей. Опыт показывает, что для ГЭС с малыми установленными мощностями асинхронные

машины в генераторном режиме имеют существенные преимущества по сравнению с синхронными генераторами. Это связано в первую очередь с низкой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации в нормальных режимах, стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом [2...4]. Но главным недостатком, является использование конденсаторных батарей для возбуждения асинхронных генераторов. В энергосистемах малой мощности их использование является нецелесообразным из-за большого потребления реактивной мощности самим генератором. АГ являются потребителями значительной реактивной мощности (50% и более от полной мощности), необходимой для создания магнитного поля в машине, которая должна поступать из сети при параллельной работе асинхронного двигателя в генераторном режиме с сетью или от другого источника реактивной мощности (батарея конденсаторов (БК) или синхронный компенсатор (СК)) при автономной работе АГ. В последнем случае наиболее эффективно включение батареи конденсаторов в цепь статора параллельно нагрузке хотя в принципе, возможно ее включение в цепь ротора. Для улучшения эксплуатационных свойств асинхронного режима генератора в цепь статора дополнительно могут включаться конденсаторы последовательно или параллельно с нагрузкой [4].

Цель работы: анализ целесообразности использования асинхронных машин с фазным ротором в качестве генератора в автономных источниках питания (ВЭС или мини ГЭС) работающих на энергосистему ограниченной мощности или в автономном режиме.

Материалы исследования: Для разработки мини генераторных систем вызывает интерес применение в качестве генератора асинхронного двигателя с фазным ротором. В системах ограниченной мощности таких как: автономные источники питания на базе ВЭС, мини и малых ГЭС, дизель-бензиновые генераторы [5].

В цепи ротора устанавливается преобразователь частоты, обеспечивающий питание обмотки ротора напряжением регулируемой частоты. Такая схема позволяет получить стабильное напряжение и частоту на выходе асинхронного генератора при широком диапазоне изменения частоты вращения ветроколеса или турбины. Учитывая возможность разнородности элементов схемы (в части временных характеристик и топологии схем замещения) построение модели системы было проведено в среде пакета PSIM. Он содержит в себе вычисление, визуализацию и программирование в удобной среде. PSIM разрешает решать широкий круг научных и инженерных задач. При моделировании с использованием PSIM реализуется принцип визуального программирования, согласно которому, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. В качестве основных элементов системы были разработаны модели следующих блоков:

блок 1 – электрическая подстанция 6/0,4 кВ (ограниченная номинальной мощностью трансформатора 630 кВА);

блок 2 – нагрузка (мощность нагрузки 200 кВт несимметрия в диапазоне 8%);

блок 3 – IGB транзисторный преобразователь возбуждения АГ с фазным ротором;

блок 4 – механическая часть генератора (турбина микроГЭС);

блок 5 – система управления IGBT преобразователем;

блок 6 – асинхронный генератор с фазным ротором мощностью 120 кВт.

В модели (рис.1) были приняты следующие допущения:

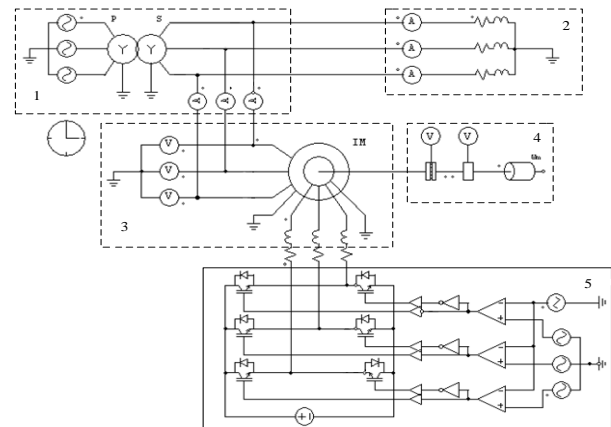


Рис. 1 – Модель автономной энергосистемы на базе асинхронного генератора с фазным ротором и инвертора напряжения

– ключевые элементы (полупроводниковые приборы) и источник питания силовой цепи асинхронного генератора имеют линейные характеристики магнитной системы;

– система формирования напряжения питания работает по классическому синусоидальному закону;

– в асинхронном генераторе не учитывается насыщение

В ходе моделирования решались следующие задачи:

– исследование режимов пуска и работы под нагрузкой генератора при синхронизированном и несинхронизированном режиме работы (сумма частот тока возбуждения и частоты вращения ротора генератора равны частоте сети) и асинхронном режиме работы (сумма частот тока возбуждения и частоты вращения ротора генератора не равны частоте сети);

– несимметричный режим работы (генератор работает в системе с несимметричной нагрузкой);

– исследования и анализ гармонического состава тока асинхронного генератора при различных режимах работы.

Стабилизацию напряжения и синхронизацию с сетью асинхронного генератора можно добиться двумя способами – по частоте вращения ротора или по магнитному потоку генератора.

Для этого были смоделированы и проанализированы два режима работы асинхронного генератора (рис.2 и рис .3)

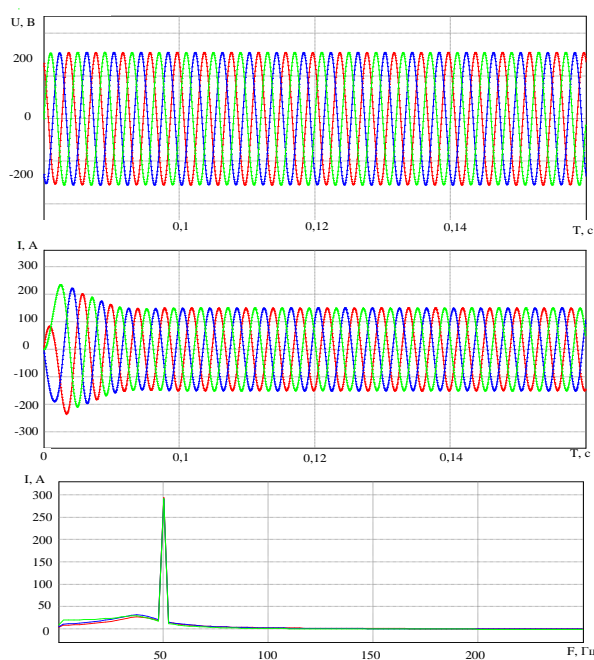


Рис. 2 – Напряжения, токи и их гармонический состав при синхронизированном режиме работы с сетью АГ

Ток и напряжение генератора синхронизировано с током и напряжением энергосистемы, что обусловлено равенством и синхронизацией частоты генератора и сети (рис. 2).

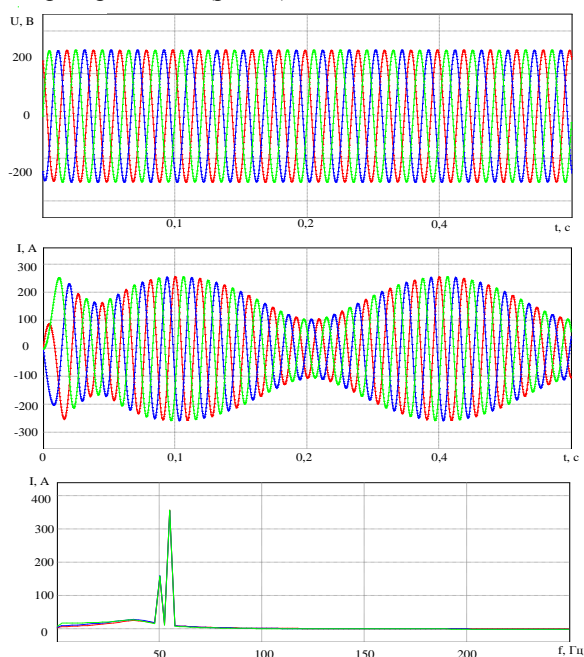


Рис. 3 – Напряжения, токи и их гармонический состав при несинхронизированном режиме работы с сетью

Как видно из (рис. 3) ток генератора несимметричен току в энергосистеме, что объясняется различием частот в энергосистеме и на выходе генератора, что приводит к режиму выхода из синхронного режима работы на сеть.

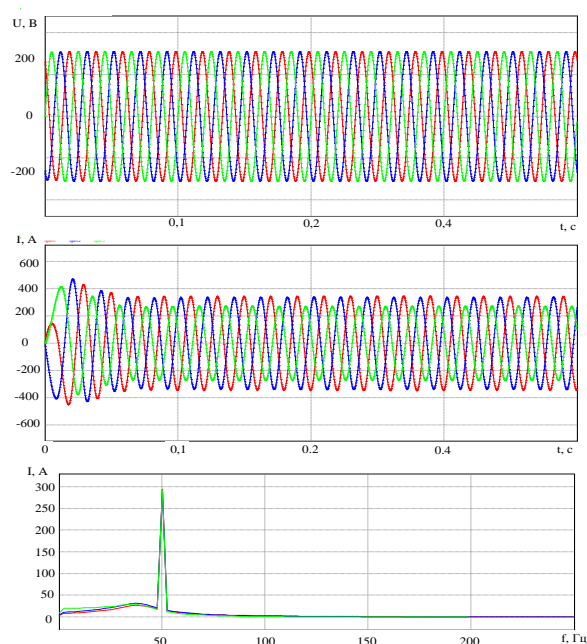


Рис. 4 – Напряжения, токи и их гармонический состав на зажимах АГ при несимметрии нагрузки

Режим работы системы при работе на несимметричную нагрузку приведен на (рис. 4).

Анализ кривых токов и напряжений (рис. 4) показал, что несимметричная нагрузка существенно влияет на режим работы генератора, а именно приводит к несимметрии токов на выходе генератора и приводит к изменению в их гармоническом составе.

На рис. 5 приведены в виде двух временных интервалов зависимости фазной средней активной мощности P_{ABC} и фазной средней реактивной мощности Q_{ABC} , полученные для случая работы с фазной несимметрией нагрузки 10% (рис. 5).

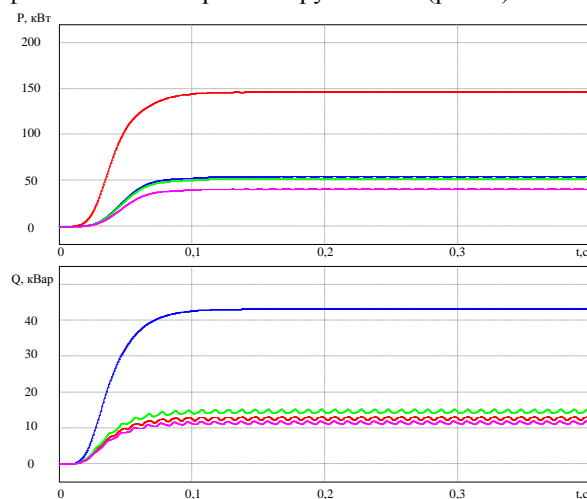


Рис. 5 – Активная и реактивная мощность (суммарная) и в каждой фазе генератора при несимметрии нагрузки 10%

Оценивание гармонического состава тока статора АГ выполнено по методике [6], на основании анализа суммарного гармонического искажения Total Harmonic Distortion (THD).

На рис. 3 (б, в) и 4 (б, в) приведен график тока статора, а также его спектральный анализ

гармонического состава. Частота ШИМ при этом составляла 2кГц. Из диаграммы FFT analysis (быстрого преобразования Фурье) видно, что помимо первой (основной) гармоники в гармоническом составе присутствуют высшие гармоники: 5-я, 7-я, 11-я и 13-я (т. е. 250, 350, 550 и 650 Гц соответственно), амплитуды которых, с ростом номера гармоники уменьшаются табл. 1. При этом коэффициент THD составляет 6.6%. Отсутствие четных гармоник, а также гармоник кратных трем объясняется тем, что ротор АГ на выходе ПЧ является симметричной нагрузкой, включенной по схеме “звезда”. С увеличением несущей частоты модуляции ШИМ, амплитуды перечисленных высших гармоник уменьшаются, что приводит к уменьшению коэффициента THD.

Таблица 1 – Гармонический состав тока АГ

	Номер гармоники				
	1	5	7	13	21
Ток (синхр. режим)	209,96	4,32	2,31	1,82	0,01
Ток (несинхр. режим)	208,12	7,12	3,56	2,41	0,09

Далее в работе был выполнен анализ целесообразности использования АД с фазным ротором в режиме СГ. Отличительная особенность СГ заключается в том, что они не нуждаются в дополнительном источнике реактивной мощности для создания рабочего магнитного потока. Мощность возбуждения СГ не превышает нескольких процентов от мощности генератора. В автономном режиме работы СГ возбуждается от выходного напряжения якорной обмотки через выпрямитель. Идея использования АГ для автономных систем давно привлекает внимание исследователей. Опыт показывает, что для малых ГЭС АД в генераторном режиме имеют существенные преимущества.

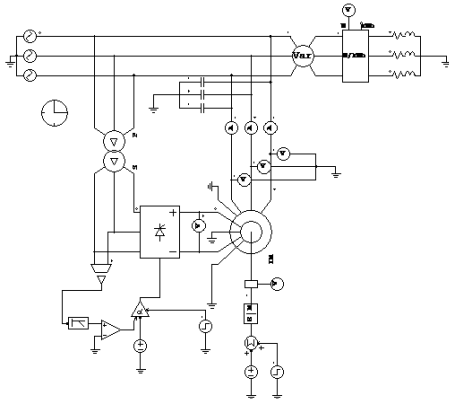


Рис. 5 – Динамическая модель автономной энергосистемы на базе АД с фазным ротором в режиме СГ

Это связано в первую очередь с низкой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации в нормальных режимах, стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом [2...4]. Возможность использования асинхронной машины с

фазным ротором в режиме СГ обоснована в работах [7]. В режиме генератора две фазы обмотки ротора используются в качестве обмотки возбуждения генератора (рис. 5).

Начальное самовозбуждение СГ осуществляется цепи статора за счет остаточного магнитного потока машины и емкостного возбуждения. При вращении ротора генератора в обмотке статора потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная ЭДС $E_{ост}$, которая создает в конденсаторе ток i_c . Этот ток, протекает по обмотке статора, усиливается, в результате чего индуцируемая в генераторе ЭДС e_2 и ток конденсатора растет

Переходный процесс самовозбуждения генератора в обмотках статора, продолжается до тех пор, пока напряжение U_2 не станет равным напряжению на конденсаторе U_c . Это условие можно выразить в виде равенства сопротивлений $X_c = X_l + X_\mu$ (где X_l – индуктивное сопротивление статора, X_μ – индуктивное сопротивление намагничивающего контура, X_c – емкостное сопротивление конденсаторов) откуда емкость, необходимая для возбуждения генератора при заданной частоте [8]:

$$C_{нач} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 (L_l + L_m)} \quad (1)$$

где L_l – индуктивность статора;

L_m – индуктивность контура намагничивания;

f_1 – частота тока статора.

Анализ режимов работы генератора в автономном режиме проводился для напряжений и токов при различной частоте вращения приводного механизма, при симметричной нагрузке (рис. 6) и несимметрии нагрузки $\pm 10\%$ (рис. 7).

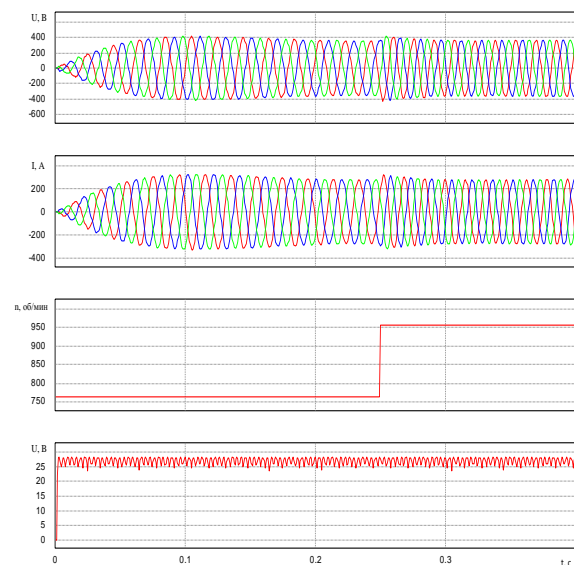


Рис. 6 – Напряжения, токи (а,б) на зажимах генератора при изменении скорости (в), напряжение ротора (г) в режиме СГ

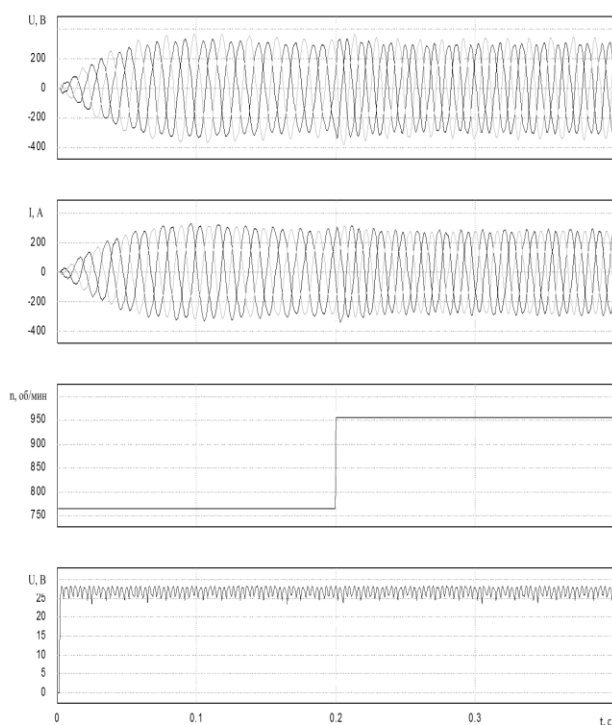


Рис. 7 – Напряжения, токи (а,б) на зажимах генератора при изменении скорости (в), напряжение ротора (г) в режиме СГ при несимметрии нагрузки

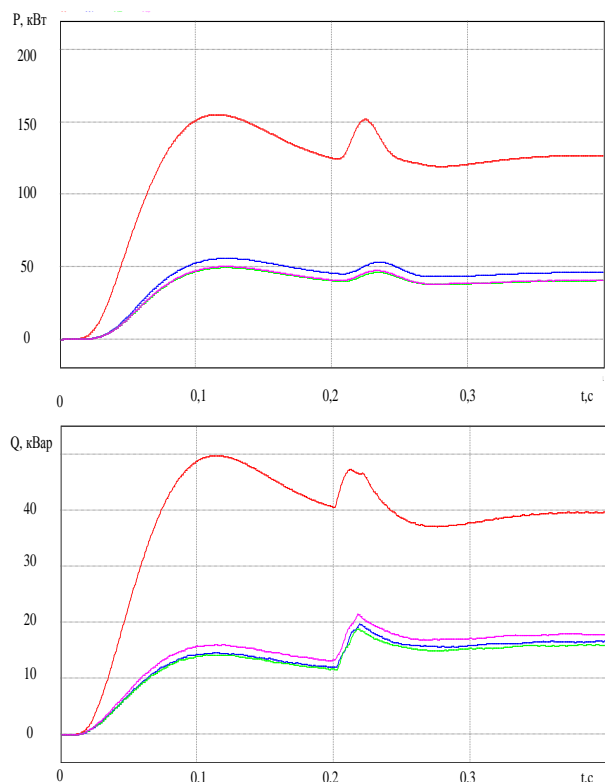


Рис. 8 – Активная мощность (а) и реактивная мощность (а) суммарная и в каждой фазе генератора при несимметрии нагрузки

Из графиков видно, что изменение скорости вращения ротора генератора существенно влияет на частоту выходного напряжения, а напряжение

возбуждения влияет только на амплитуду выходного напряжения. А несимметрия нагрузки приводит к несимметрии напряжений, токов и соответственно генерируемых мощностей (рис. 8).

Выводы: Существующие системы регулирования напряжения автономных асинхронных генераторов рассчитаны на номинальную или к близкую к номинальной скорости ротора генератора. В случае, когда первичным двигателем служит микротурбина с мощностью равной или близкой к мощности генератора, скорость ротора генератора может существенно изменяться в зависимости от напора воды и нагрузки генератора. Это в свою очередь может привести к отклонению выходного напряжения генератора за пределы допустимого значения. Как показал проведенный анализ, изменения частоты ШИМ возбуждения и скорости вращения ротора генератора существенно влияет на качество выходного напряжения, а именно приводит к изменению в гармоническом составе генерируемого напряжения. Подключении к энергосистеме несимметричной нагрузки, приводит к появлению несимметрии в токе генератора. Для нормального режима работы энергосистемы несимметрия нагрузки не должна превышать $\pm 5\%$. Эту проблему возможно решить путем построения замкнутой системы регулирования возбуждением с пофазным регулированием частоты и напряжения на выходе возбудителя. Увеличение частоты модуляции ШИМ улучшает гармонический состав тока фазы статора АГ. Оптимальная несущая частота составляет 10 кГц. Дальнейшее повышение частоты ШИМ к существенному уменьшению THD не приводит.

Список литературы

1. Свит П.П. Разработка микро-ГЭС с асинхронными генераторами для сельскохозяйственных потребителей: автореф. канд. техн. наук. Барнаул, 2007. – 24с.
2. Григораш О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике. // Промышленная энергетика. – 1995, №3. – С.29–32.
3. Шокарьов Д.А., Колесник Я. Н. Анализ систем возбуждения асинхронных генераторов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, вип.1 – Кременчук, 2003, С. 116–1205.
4. Гриценко О. І., Маслов В.С., Пасічник В. І., Риков Г. Ю., Родькін Д. Й., Шокарьов Д.А. Спосіб формування джерела аварійного резервного живлення і пристрій для його здійснення Патент. № 73706. Україна МПК (2007.01) H02J 9/00, F02D 11/10 – заявник та патентоутримувач Кременчуцький державний політехнічний університет. – № а200606814; Заявл.19.04.2005 ; Опубл. 15.08.2005, бюл. № 1
5. Зачепа Ю. В. Шокарев Д. А. К вопросу построения системы регулирования емкостного тока возбуждения асинхронного генератора // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 4/2006 (39). Частина 1 – Кременчук, 2006, С. 82–84.
6. Герман-Галкин С.Г. Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей. Моделирование устройств силовой электроники / Герман-Галкин С.Г. // Силовая электроника. – 2008 г. – №1. – с. 92–99
7. Чернопяттов Н.Н., Петров Г.А., Емец В.Ф., Частовский А.В. Использование асинхронных двигателей в качестве синхронных генераторов // Изв. вузов, серия: Энергетика, 1983, №9/.
8. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Электрические машины, М., Высшая школа, 1988, 329 с.

References (transliterated)

1. Svit P.P. Razrabotka mikro-GES s asinhronnyimi generatorami dlya selskohozyaystvennykh potrebiteley: avtoref. kand. tehn. nauk. Barnaul, 2007. – 24s.
2. Grigorash O.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniya asinhronnykh generatorov v avtonomnoy ener-getike.// Promyshlennaya energetika. – 1995, №3. –S.29–32.
3. Shokarov D.A., Kolesnik Ya. N. Analiz sistem возбуждениya asinhronnykh generatorov VIsnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo unIversitetu, vyip.1 – Kremen-chuk, 2003, C. 116–1205.
4. Gritsenko O. I., Maslov V.E., PasIchnik V. I., Rikov G. Yu., Rodkin D. Y., Shokarov D.A. SposIb formuvannya dzhe-rela avarIynogo rezervnogo zhivlennya I pristrIy dlya yogo zdIysnennya Patent. №73706. UkraYina MPK (2007.01) H02J 9/00, F02D 11/10 – zayavnik ta patentoutrimuvach Kremenchu-tskiy derzhavniy politehnichniy unIversitet. –№ a200606814; Zayavl. 19.04.2005 ; Opubl. 15.08.2005, byul. №1
5. Zacheпа Yu. V. Shokarev D. A. K voprosu postroyeniya sis-temy regulirovaniya emkostnogo toka возбуждениya asinh-ronnogo generatora VIsnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo unIversitetu. Vipusk 4/2006 (39). Chastina 1 – Kremen-chuk, 2006, C. 82–84.
6. German–Galkin S.G. Modelnoe issledovanie osnovnykh harakteristik silovyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley. Modelirovaniye ustroystv silovoy elektroniki / German–Galkin S.G. // Silovaya elektronika. –2008 g. –№1. –s. 92–99
7. Chernopyatov N.N., Petrov G.A., Emets V.F., Chastovskiy A.V. Ispolzovanie asinhronnykh dvigateley v kachestve sinhronnykh generatorov /Izv.vuzov,seriya: Energeti-ka, 1983, #9/.
8. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorohovich A.E., Elektricheskie mashiny, M., Vysshaya shkola, 1988, 329 s.

Надійшла (received) 05.01.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шокарьов Дмитро Анатолійович (Шокарев Дмитрий Анатольевич, Shokarov Dmytro Anatol'yevich), канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, shokareff@gmail.com.

Михайличенко Дмитро Анатолійович (Михайличенко Дмитрий Анатольевич, Mykhailychenko Dmytro Anatol'yevich), старший викладач кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна, м. Кременчук, вул. Первомайская 20, E-mail: lindenn@ukr.net

Риков Геннадій Юрійович (Рыков Геннадий Юрьевич, Rykov Gennadiy Yur'yevich), старший викладач кафедри електричних машин і апаратів, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна, м. Кременчук, вул. Першотравнева 20

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.